DOI:10.11931/guihaia.gxzw201805042

秸秆生物炭对尼泊金乙酯的吸附特性研究

张娱[1,2,3,4]，陈琦[1,2,3,4]，唐志书[1,2,3,4*]，李渊[1,2,3,4]，刘世军[1,2,3,4]

（1.陕西中医药大学，陕西 咸阳 712083；2.陕西省中药资源产业化协同创新中心，陕西 咸阳 712083；3.陕西省中药基础与新药研究重点实验室，陕西 咸阳 712083；4.陕西省风湿与肿瘤类中药制剂工程技术研究中心，陕西 咸阳 712083）

摘 要：为促进秸秆的资源化利用，以甘蔗渣、茄子秸秆、玉米芯为材料，采用慢速热解技术于 500 ℃条件下制备甘蔗渣生物炭(SBC)、茄子秸秆生物炭(EBC)、玉米芯生物炭(CBC)，检测其去除水中尼泊金乙酯的特性。吸附试验结果表明，生物炭的制备原料显著影响其对尼泊金乙酯的吸附效果，3 种秸秆制备的生物炭对尼泊金乙酯的吸附能力表现为 SBC>EBC>CBC。此外，水中尼泊金乙酯的初始浓度、吸附温度和时间等因素均能影响吸附效果。三种生物炭对尼泊金乙酯的去除率随尼泊金乙酯初始浓度的增加而降低，高温有利于吸附。45 ℃下尼泊金乙酯初始浓度为 30 mg·L^{-1}时，甘蔗渣生物炭(SBC)对尼泊金乙酯的去除率最高，达 99.7%。反应在最开始的 120 min 内增加迅速，经过 270 min 达到吸附平衡。生物炭对尼泊金乙酯的等温吸附线符合 Langmuir 模式和 Freundlich 模式。研究结果为农业秸秆废弃物应用于尼泊金乙酯等有机污染物的去除提供了理论依据。

关键词：生物炭，甘蔗渣，茄子秸秆，玉米芯，尼泊金乙酯

中图分类号：X131　　　　　**文献标识码**：A

Adsorption characteristics of ethyl paraben from aqueous solution using corn straw biochar

ZHANG Yu[1,2,3,4]，CHEN Qi[1,2,3,4]，TANG Zhishu[1,2,3,4]，LI Yuan[1,2,3,4]，LIU Shijun[1,2,3,4]

（1. *Shaanxi University of Chinese Medicine*, Xianyang 712083, Shaanxi, China；2. *Shaanxi Collaborative Innovation Center of Chinese Medicinal Resource Industrialization*, Xianyang 712083, Shaanxi, China；3. *Shaanxi Province Key Laboratory of New Drugs and Chinese Medicine Foundation Research*, Xianyang 712083, Shaanxi, China；4. *Shaanxi Rheumatism and Tumor Center of TCM Engineering Technology Research*, Xianyang 712083, Shaanxi, China）

Abstract: To promote the utilization of straw in resources, sugarcane residue，eggplant straw，corn straw was used as raw material to prepare the biochar adsorbent at 500 ℃，which were named SBC、EBC and CBC. Biochar is a carbon-rich product of biomass produced by thermal decomposition under limited oxygen supply at a relatively low temperature. Ethyl paraben was subject to batch adsorption in aqueous medium by the prepared biochar. The results of adsorption experiments showed that the kind of raw materials significantly affects its adsorption effect on ethyl paraben. The adsorption capacity of ethyl paraben from three kinds of biochar was SBC>EBC>CBC. In addition，the initial concentration of ethyl paraben in waste water, the temperature and time of adsorption can also affect the adsorption effect. The removal rates of ethyl paraben by three biochar decreased with increasing initial concentration of ethyl paraben. High temperature is beneficial to adsorption. When the initial concentration of

基金项目：国家自然科学基金（51679085）；陕西中医药大学科研基金（2015PY10）[Supported by the National Natural Science Foundation of China (51679085); the Science Foundation of Shaanxi University of Chinese Medicine (2015PY10)]。

作者简介：张娱（1984-），女，湖南岳阳市人，博士，讲师，主要研究方向为固体废物资源化，(E-mail) zhangyu19432@163.com。

***通信作者**：唐志书，博士，教授，主要研究方向为中药资源产业化，(E-mail)tzs6565@163.com。

ethyl paraben was 30 mg L^{-1} and the adsorption temperature was 25 ℃，the removal rate of ethyl paraben was up to 99.7% after SBC adsorption. The reaction increased rapidly at the beginning of 120 min and reached the adsorption equilibrium after 270 min. The isothermal adsorption line for ethyl paraben conforms to the Langmuir mode and the Freundlich mode. The results provided a theoretical basis for the removal of organic pollutants such as ethyl paraben.

Key words：biochar, sugarcane residue, eggplant straw, corn straw, ethyl paraben

秸秆作为一种重要的可再生生物质资源，合理开发利用越来越受到人们的关注（杨晨璐等，2018；周颖等，2018）。近年来兴起的生物炭技术，一方面能够为低价值或废弃的生物质提供良好的转化途径；另一方面，制备的生物炭可以作为一类新型的环保材料用于污染水体、土壤的治理和修复。生物炭是一种常用的高效吸附材料，是指由含碳量丰富的生物质在无氧或限氧的条件下低温热解而得到的一种细粒度、多孔性的碳质材料。生物炭由于在炭化过程中非碳元素的分解，从而形成了疏松多孔的结构，作为一种很好的吸附材料，在吸附有机污染物、改善土壤环境等方面引起研究人员越来越多的关注（Yu et al, 2017; Weber & Quicker, 2018）。据报道，生物炭对有机污染物的吸附能力远远强于其它形式天然有机质。所以生物炭在治理环境污染方面有巨大潜力，并且生物炭原料来源广泛，因此其有望作为廉价的吸附剂而广泛应用(Meyer et al, 2011; Fidel et al, 2017)。

尼泊金乙酯主要用作食品、化妆品、医药的杀菌防腐剂。据报道，尼泊金乙酯具有内分泌干扰作用，是一类新的环境雌激素污染物，广泛存在于各种水体中(Dhaka et al, 2018; Brausch et al, 2011)。因此研究有效地控制尼泊金乙酯在水中的浓度对环境污染的修复具有重大的意义。

目前生物炭在水体中的应用研究主要集中在去除重金属离子等带电污染物，对去除尼泊金乙酯等疏水性污染物的研究较少。本研究以甘蔗渣、茄子秸秆、玉米芯为原料，在 500 ℃热解温度下制备生物炭来吸附水中的尼泊金乙酯，研究热解温度、尼泊金乙酯初始浓度、吸附温度和吸附时间对尼泊金乙酯吸附效率的影响，揭示秸秆生物炭对尼泊金乙酯的吸附特性，为秸秆的资源化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

尼泊金乙酯（ethyl paraben，简写为 EP）为分析纯，购自天津市致远化学试剂有限公司。

仪器设备：电子天平（德国赛多利斯）、紫外可见分光光度计（日本岛津）、马弗炉（北京科伟永兴）、水浴恒温振荡器（常州丹瑞）、粉碎机（天津鑫博得）、电热鼓风干燥箱（北京科伟永兴）。

1.2 方法

1.2.1 秸秆生物炭的制备

甘蔗渣（sugarcane residue）取自陕西省咸阳市某农贸市场，茄子秸秆（eggplant straw）、玉米芯（corn straw）取自陕西省咸阳市某农村，清洗晾干后放入烘箱在 60 ℃下烘干 72 h，粉碎后置于瓷坩埚中，盖上盖子，放入马弗炉中，以 2℃ min^{-1} 的升温速率升至 500 ℃，随后保持 2 h。冷却后取出，研磨过 60 目筛，储存于干燥器中备用。标记为 SBC、EBC、CBC。

1.2.2 EP 含量的测定

采用紫外分光光度法检测 EP 的含量，以背景溶液为空白，在 200～400 nm 波长内扫描，得到 EP 的最大吸收波长为 247 nm。每组进行 3 个平行试验，取其平均值。称取 EP 0.125 0 g，置于 250 mL 容量瓶中，加蒸馏水稀释至刻度，得到 EP 的 500 mg L^{-1} 储备液。分别量取此溶液用蒸馏水稀释至 10、20、30、40、50 mg L^{-1}，用紫外分光光度计（岛津 UV-2600，日本）在 247 nm 波长下分别测得吸收值，得回归方程 y=0.070 9 x+0.0 127，R^2=0.999 9 (n=5)。

用紫外可见分光光度法（λ=247 nm）测定吸附后的 EP 浓度，每组进行 3 个平行实验，取其平均值。达到吸附平衡后的 EP 吸附量 q_e 及去除率 η，由下列公式计算：

$$q_e=\frac{(C_0-C_e)}{W}\cdot V$$

$$\eta=\frac{C_0-C_e}{C_0}\times 100\%$$

式中，q_e 为平衡时的吸附量，mg g^{-1}；C_0 和 C_e 分别为吸附前和吸附后溶液中 EP 的含量，mg L^{-1}；V 为溶液体积，L；W 为吸附剂投加量，g。

1.2.3 EP 初始浓度对吸附的影响

称取 0.10 g SBC、EBC、CBC 各 7 份，分别加入事先配置好的 20、30、40、50、60、70、80 mg L^{-1} 的 EP 溶液 20 mL 于 50 mL 具塞三角瓶中，在 25 ℃恒温水浴振荡箱中以 150 r/m 振荡 3 h 以达到吸附平衡状态，过 0.45 μm 微孔滤膜，在 270 nm 处测定剩余 EP 的吸光度值，根据标准曲线计算出剩余 EP 浓度。

1.2.4 温度对吸附作用的影响

称取 0.1 g SBC、EBC、CBC 各 7 份，分别加入事先配置好的 20、30、40、50、60、70、80 mg L^{-1} 的 EP 溶液 20 mL 于 50 mL 具塞三角瓶中，分别在 25、35 和 45 ℃下进行恒温振荡吸附 3 h 以达到吸附平衡状态，过 0.45 μm 微孔滤膜，在 270 nm 处测定剩余 EP 的吸光度值，根据标准曲线计算出剩余 EP 浓度。

1.2.5 反应时间对吸附作用的影响

在常温常压下，取 10 份 EP 浓度为 50 mg L^{-1} 的溶液各 20 mL，分别置于 10 个 50 mL 三角瓶中，均加入 0.1 g SBC、EBC、CBC，在 150 r min^{-1} 下搅拌 5、10、20、30、45、60、90、120、150、180 min，静置 1 h，测定剩余 EP 浓度，计算去除率。

1.2.6 等温吸附模型拟合

用 Langmuir 和 Freundlish 模型拟合三种生物炭对 EP 的吸附等温线。Langmuir 方程是用于描述吸附平衡行为中一种应用十分广泛的模型。Langmuir 模型是理想的单分子层吸附模型，单分子吸附公式为：

$$q_e=abC_e/(1+aC_e)$$

式中，q_e 为吸附容量，C_e 为吸附平衡浓度，a、b 为常数，其倒数式为：

$$q_e^{-1}=(1/ab)C_e^{-1}+(1/b)$$

从式中可以看出， q_e^{-1} 与 C_e^{-1} 成线性关系。根据 Freundlish 经验式：

$$q_e=KC_e^{1/n}$$

式中，K 为常数，其方程式的线性形式：

$$\lg q_e=\lg K+(1/n)\lg C_e$$

1.3 数据分析

实验所得数据采用 Sigmaplot 10.0 软件进行拟合。

2 结果与分析

2.1 SBC、EBC、CBC 对 EP 的吸附

2.1.1 SBC、EBC、CBC 对不同初始浓度 EP 的去除率

如图 1 所示，三种生物炭对 EP 的去除率随 EP 初始浓度的增加整体上呈降低趋势。SBC 在 EP 初始浓度为 30 mg L^{-1}时，对 EP 的去除率最高，达 99.7%；EBC 在 EP 初始浓度为 40 mg L^{-1} 时，对 EP 的去除率最高，达 98%；CBC 在 EP 初始浓度为 30 mg L^{-1} 时，对 EP 的去除率最高，达 99.6%。

综上可见，不同来源秸秆生物炭对 EP 的吸附效率有一定差异，SBC 对 EP 的平均去除率在 98%左右，EBC 对 EP 的去除率在 97%左右，CBC 对 EP 的去除率在 95%左右。SBC 对 EP 的吸附率最高，其原因可能是 SBC 的微孔数量最多，孔隙度和比表面积最大，吸附率相应最高。

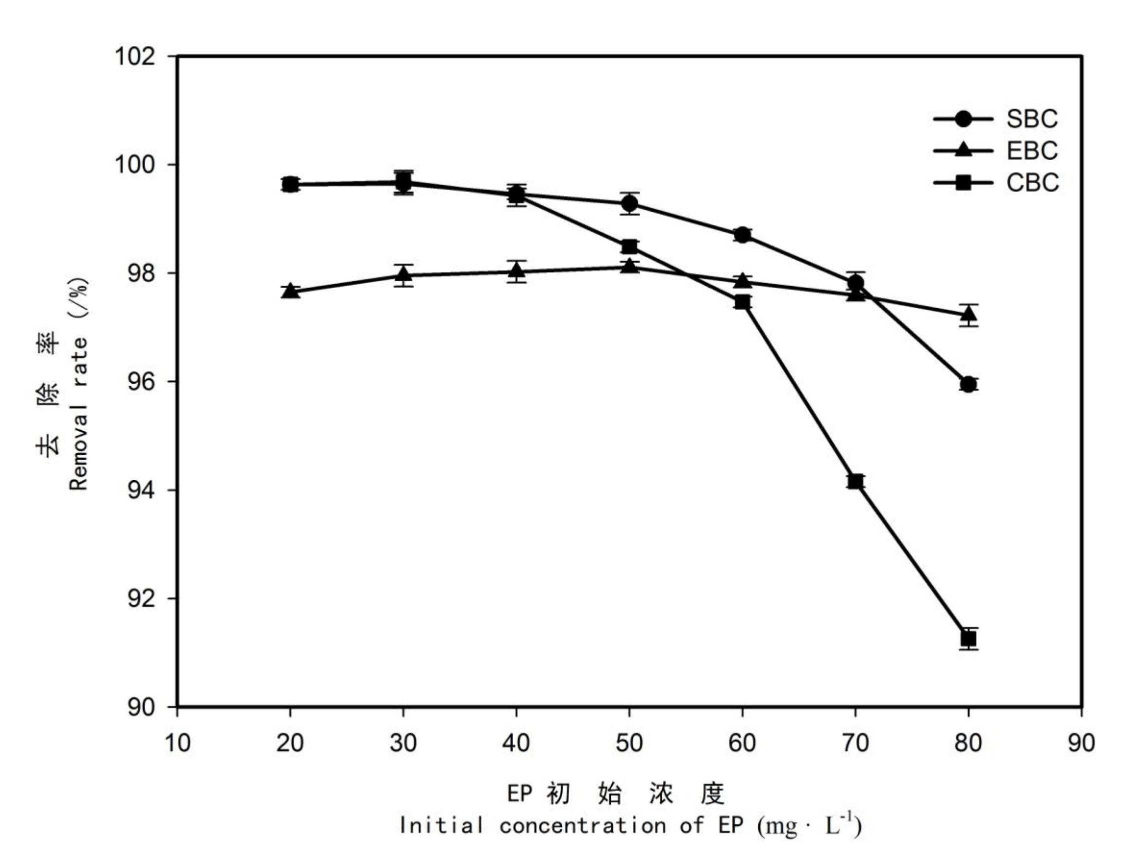


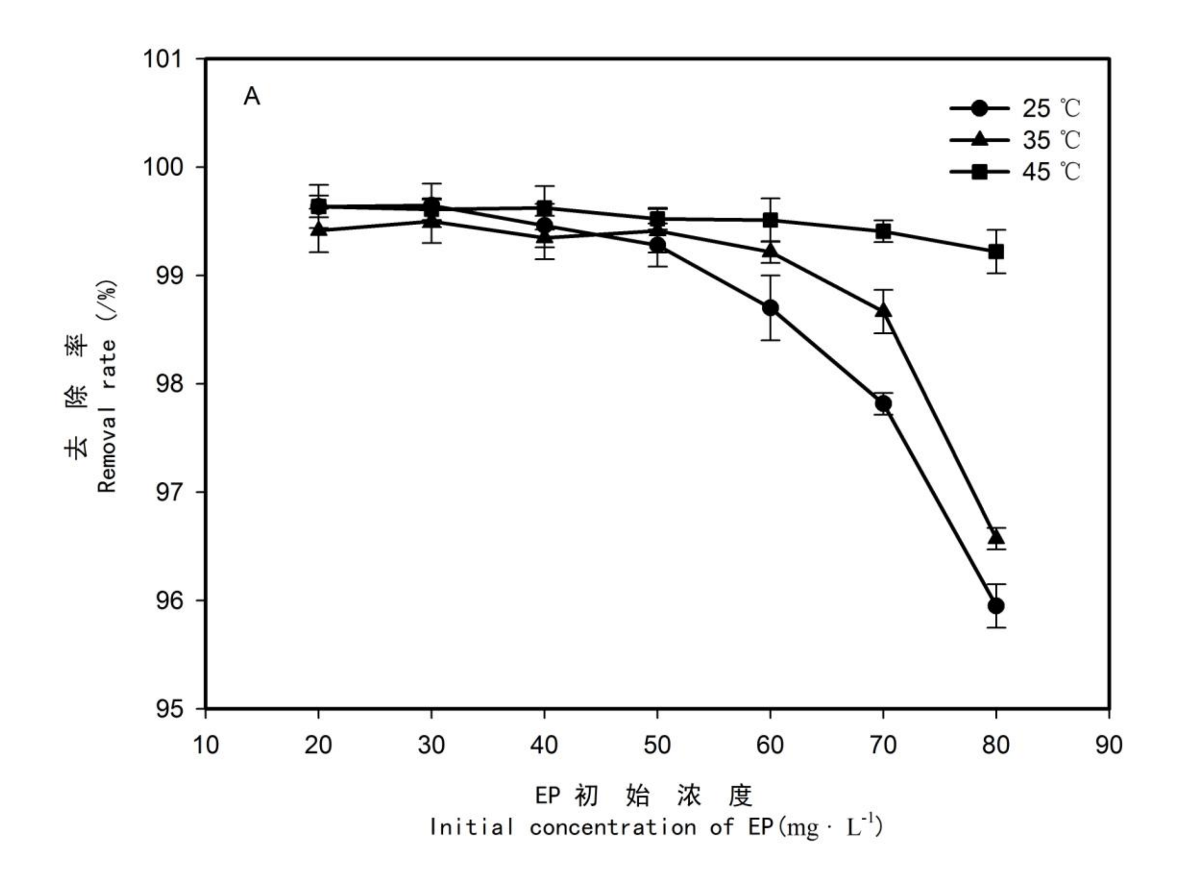
图 1 秸秆生物炭对不同初始浓度 EP 的去除率

Fig.1 Removal rates of EP with different initial concentrations by corn straw biochar

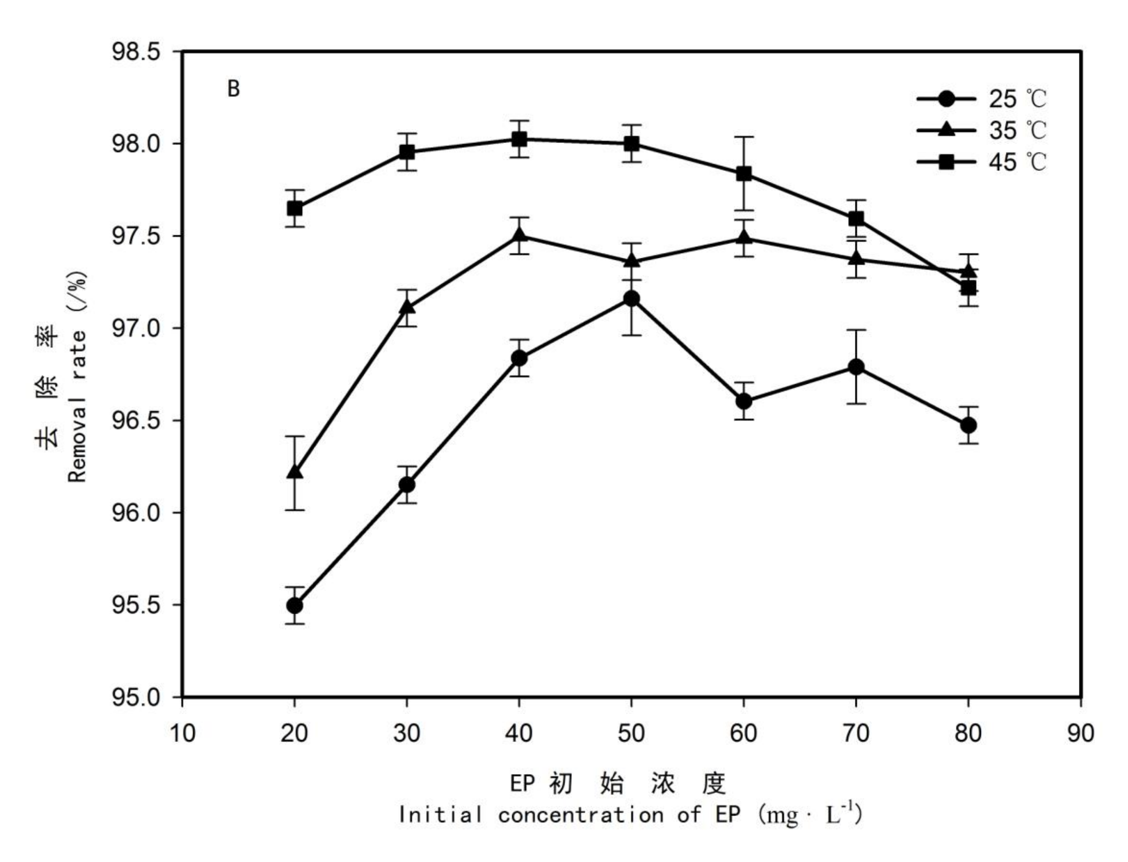
2.1.2 温度对秸秆生物炭吸附 EP 的影响

SBC、EBC、CBC 分别在 25、35、45 ℃吸附 4 h 后的 EP 去除率见图 2。三种热解温度下的秸秆生物炭对 EP 的去除率随温度的升高整体上呈逐渐增加的趋势。吸附温度升高，去除率增大，说明吸附反应属于吸热过程，生物炭和 EP 之间的吸附主要是由化学键力引起的，吸附牢固，解析困难。

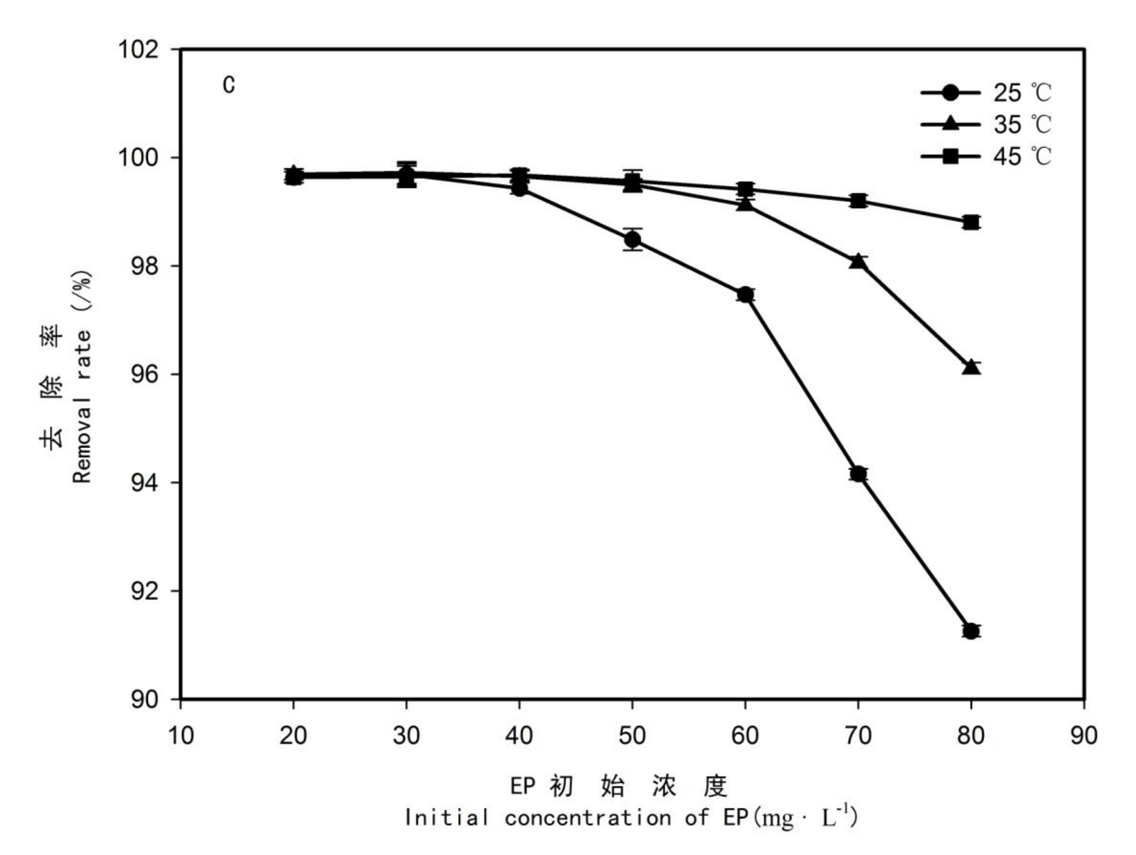
从图 3 可见，SBC 对 EP 的最大去除率为 99.6%，出现在 EP 初始浓度 20 mg L^{-1}、吸附温度为 45 ℃时；EBC 对 EP 的最大去除率为 98%，出现在 EP 初始浓度 40 mg L^{-1}、吸附温度为 45 ℃时；CBC 对 EP 的最大去除率为 99.7%，出现在 EP 初始浓度 40 mg L^{-1}、吸附温度为 45 ℃时。随着 EP 初始浓度的加大，SBC、EBC、CBC 对 EP 的去除率逐渐降低。



A
25 ℃
35 ℃
45 ℃
去除率
Removal rate (/%)
EP初始浓度
Initial concentration of EP(mg·L-1)



B
25 ℃
35 ℃
45 ℃
去除率
Removal rate (/%)
EP初始浓度
Initial concentration of EP (mg·L-1)



注：**A**. 甘蔗渣生物炭；**B**. 茄子秸秆生物炭；**C**. 玉米芯生物炭。

Note：**A**. SBC; **B**. EBC; **C**. CBC.

图 2 温度对秸秆生物炭吸附不同浓度 EP 的影响

Fig.2 Effects of temperature on adsorption of different concentrations of EP by straw biochar

从整体上看，高温有利于吸附。温度对 EP 的吸附有明显的影响，在所选温度范围内，随着温度的升高，去除率逐渐增加，在 45 ℃下，CBC500 对初始浓度 40 mg Ł$^{-1}$ 的 EP 的去除率高达 99.7%。

2.1.3 秸秆生物炭对 EP 的吸附率随时间的变化

从图 3 可知，在反应开始阶段，秸秆生物炭对 EP 的去除率增速较快，在最开始的 120 min 内增加迅速，随着反应的进行，去除率逐渐增大，在 120 min 至 150 min 内吸附率缓慢上升，之后吸附过程慢慢趋于平稳，反应进行 180 min 后，延长反应时间，去除率基本保持不变，在充分振荡 270 min 后吸附反应达到平衡。由此可知，用秸秆生物炭吸附 EP，作用时间为 270 min，吸附反应即可达到平衡状态。随着吸附时间的推移，秸秆生物炭能够继续保持较高的去除率，几乎没有出现解吸现象，说明在吸附位点形成了较强的化学键，一旦吸附就不容易解吸。在相同的吸附时间内，三种生物炭对 EP 吸附能力高低为 SBC>CBC>EBC。当达到吸附平衡后，SBC 的吸附率将近 99%，CBC 的吸附率接近 98%；EBC 的吸附率几乎达到 97%。

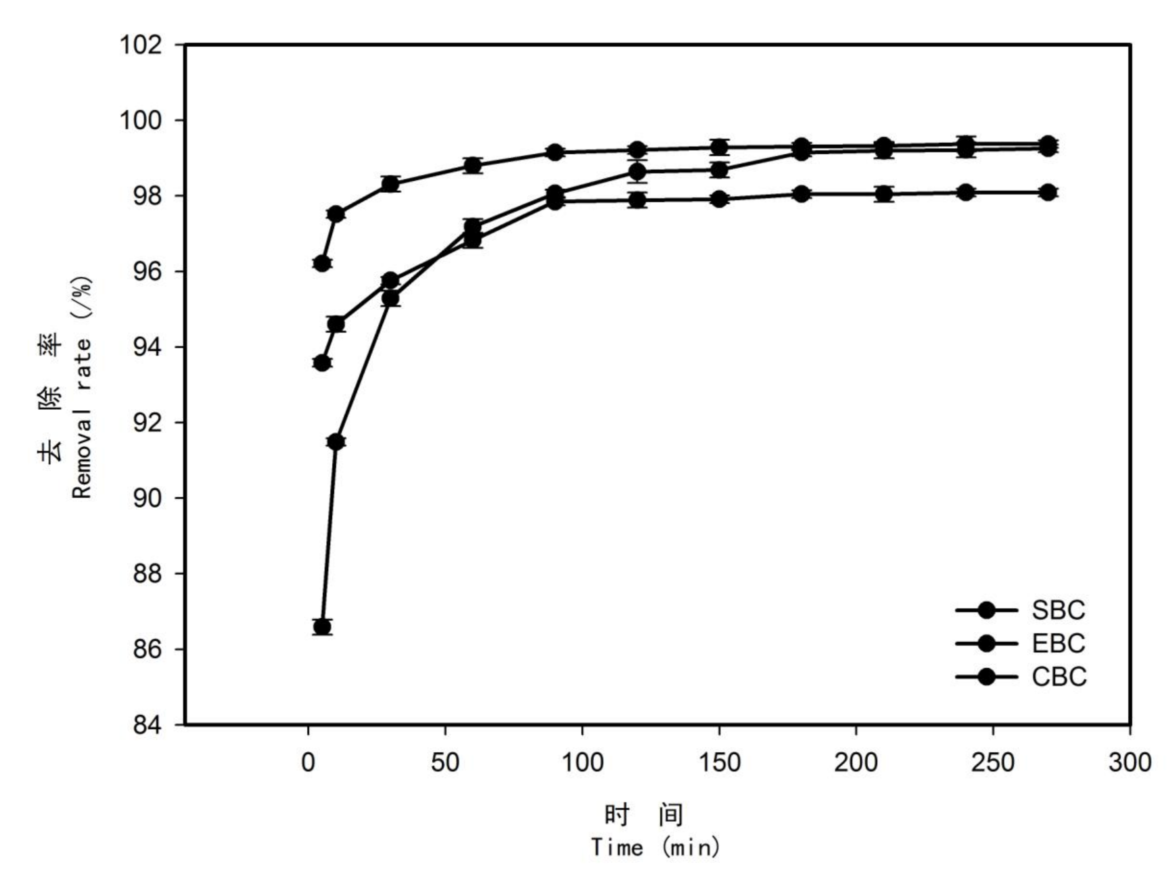
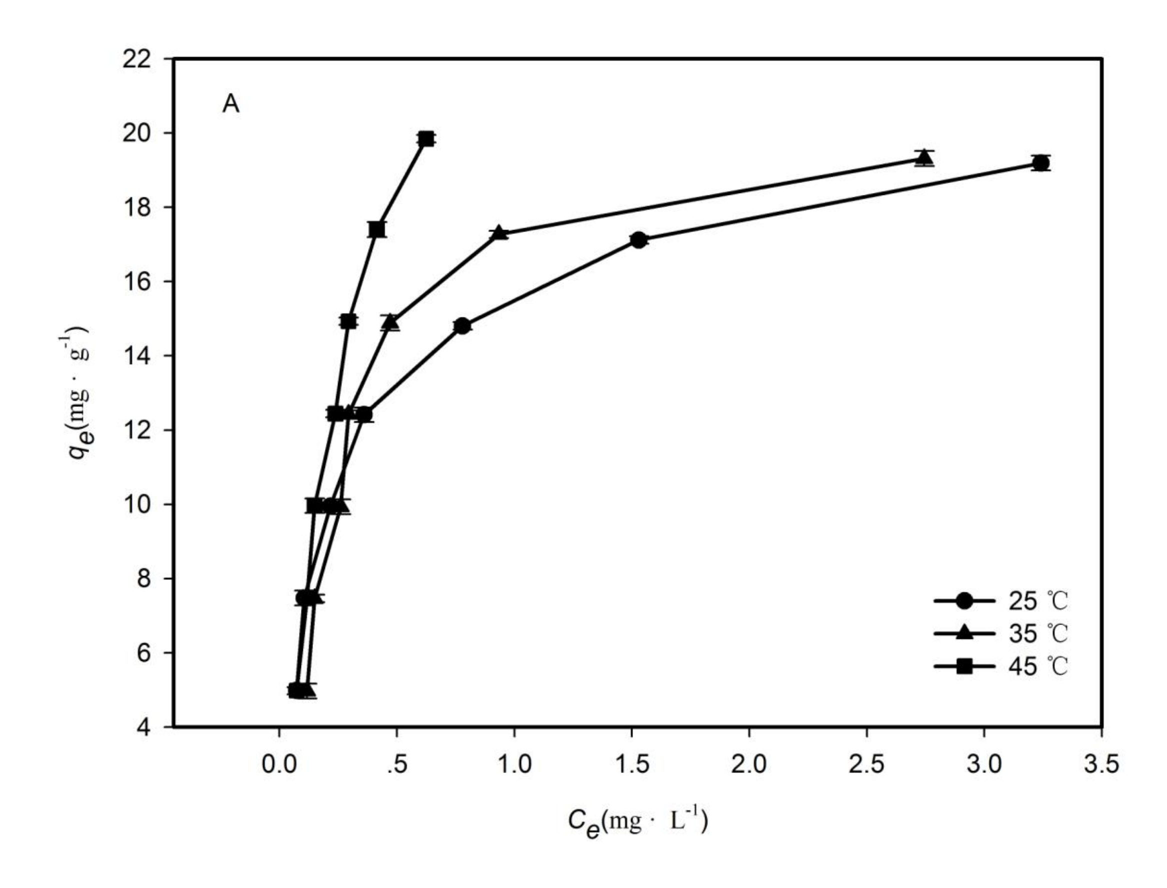


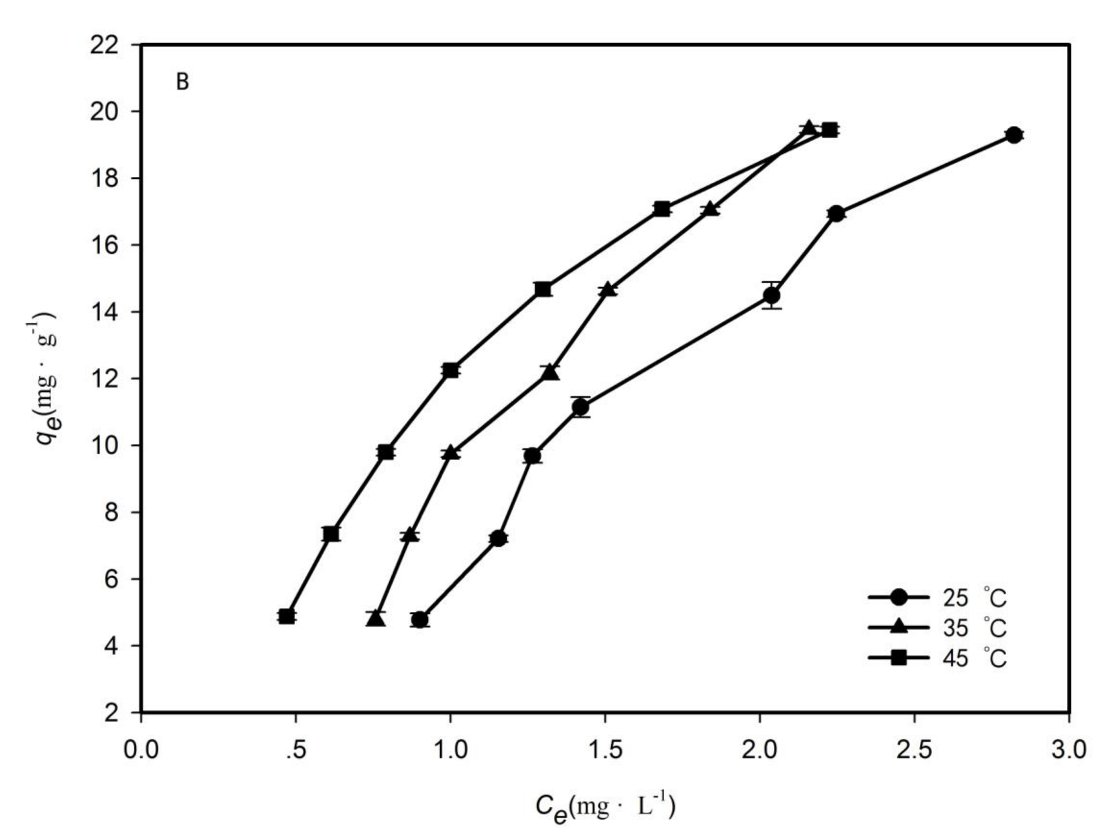
图 3 秸秆生物炭对 EP 的吸附率与吸附时间的关系

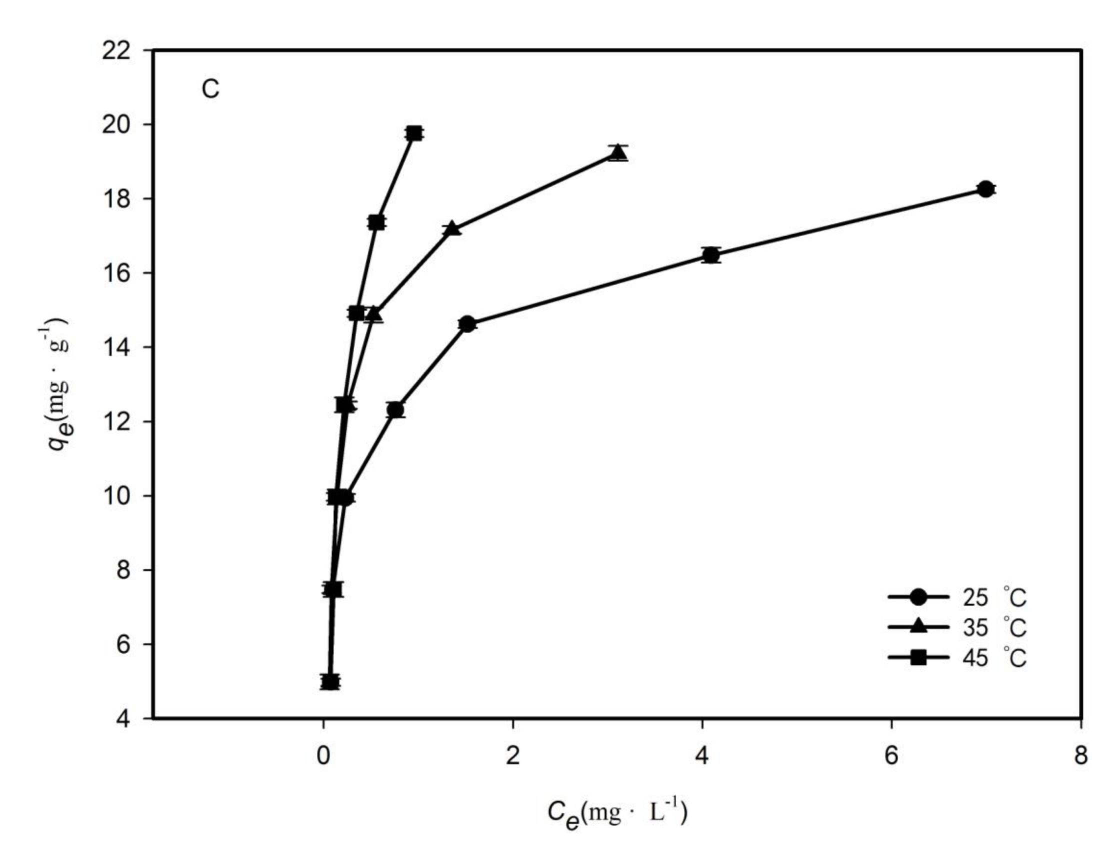
Fig.3 Relationships between adsorption rate and adsorption time of EP by three kinds of biochar

2.2 吸附等温模型

通过 Langmuir 等温模型与 Freundlich 等温模型对实验数据进行拟合，2 种拟合模式基本上呈良好的线性关系。SBC、EBC、CBC 对 EP 的吸附等温线如图 4 中 A、B、C 所示。生物炭对 EP 的平衡吸附量随吸附温度的升高而增大。


A
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
0.0
.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
q_e(mg · g^{-1})
C_e(mg · L^{-1})
25 ℃
35 ℃
45 ℃


B
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0.0
.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
q_e(mg · g^{-1})
C_e(mg · L^{-1})
25 ℃
35 ℃
45 ℃



注：**A**. 甘蔗渣生物炭；**B**. 茄子秸秆生物炭；**C**. 玉米芯生物炭。

Note：**A**. SBC; **B**. EBC; **C**. CBC.

图 4 秸秆生物炭对 EP 的吸附等温线

Fig.4 Adsorption isotherms of EP onto biochars

由表 1 可知，不同吸附温度下秸秆生物炭对 EP 的吸附均符合 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温方程。Langmuir 方程中 *b* 代表吸附平衡常数，是吸附与解析速率常数的比值，*b* 值越大，表明吸附能力越大。由表 1 可见，随吸附温度的降低，*b* 值变小，说明高温有利于生物炭对 EP 的吸附。Freundlich 方程中吸附常数 *K* 反映吸附能力的强弱，*K* 值越大，表征吸附能力越强。由表 1 可见，随吸附温度的降低，*K* 值变小，说明降低温度不利于生物炭对 EP 的吸附。

表 1　Langmuir 和 Freundlich 模式吸附常数和确定系数

Table 1 Langmuir and Freundlich isotherm constants and correlation coefficients for the adsorption of EP

吸附模式 Adsorption mode			线性回归方程 Equation of linear regression	R^2	吸附等温常数 Adsorption isotherm constant	P
Langmuir	CBC	45 ℃	y = 0.011 2x + 0.032 3	0.958 6	*a*=2.88, *b*=30.96	<0.05
		35 ℃	y = 0.008 6x + 0.047 3	0.965 6	*a*=5.50, *b*=21.14	<0.05
		25 ℃	y = 0.009 1x + 0.059 5	0.946 2	*a*=6.54, *b*=16.81	<0.05
	SBC	45 ℃	y = 0.012 5x + 0.026 3	0.993 1	*a*=2.10, *b*=38.02	<0.05
		35 ℃	y = 0.017 4x + 0.034 4	0.945 1	*a*=1.98, *b*=29.07	<0.05
		25 ℃	y = 0.010 3x + 0.050 8	0.982 2	*a*=4.93, *b*=19.69	<0.05

	EBC	45 ℃	y = 0.089x + 0.000 8	0.963 5	*a*=0.01, *b*=39.38	<0.05
		35 ℃	y = 0.198 7x + 0.033 2	0.906 2	*a*=0.17, *b*=30.12	<0.05
		25 ℃	y = 0.163 2x + 0.036 4	0.899 7	*a*=0.22, *b*=27.47	<0.05
Freundlish	CBC	45 ℃	y = 0.498 9x + 1.367	0.908 2	*K*=23.28, 1/*n*=0.498 9	<0.05
		35 ℃	y = 0.308 1x + 1.200 5	0.865 9	*K*=15.87, 1/*n*=0.308 1	<0.05
		25 ℃	y = 0.247 2x + 1.088 6	0.910 4	*K*=12.26, 1/*n*=0.247 2	<0.05
	SBC	45 ℃	y = 0.646 5x + 1.481 7	0.966 5	*K*=30.32, 1/*n*=0.646 5	<0.05
		35 ℃	y = 0.399 5x + 1.210 2	0.812 6	*K*=16.23, 1/*n*=0.399 5	<0.05
		25 ℃	y = 0.331 1x + 1.174 5	0.918 1	*K*=14.95, 1/*n*=0.331 1	<0.05
	EBC	45 ℃	y = 1.230 7x + 0.917 8	0.942 8	*K*=8.28, 1/*n*=1.230 7	<0.05
		35 ℃	y = 1.167x + 0.809 9	0.921 1	*K*=6.46, 1/*n*=1.167	<0.05
		25 ℃	y = 0.866 9x + 0.040 4	0.955 7	*K*=1.10, 1/*n*=0.866 9	<0.05

3 结论与讨论

关于甘蔗渣和玉米芯生物炭吸附剂已有较多报道，有研究者发现甘蔗渣生物炭能提高砖红壤对氧氟沙星的吸附量（陈淼等，2015），玉米芯生物炭对水中氨氮和对硝基苯酚都有较好的吸附效果。本研究选取新的环境雌激素污染物尼泊金乙酯为研究对象，在 500℃下制备甘蔗渣、玉米芯、茄子秸秆生物炭，用来吸附水中的尼泊金乙酯，以期对农业秸秆废弃物实现最大化利用。研究发现这三种生物炭对低浓度尼泊金乙酯有较强的吸附作用，吸附能力大小为 SBC>EBC>CBC。作为一种新型的吸附剂，原料易得且制作方法简单，具有较高的开发应用价值。秸秆生物炭是一种很好的吸附剂，在污水处理领域有广阔应用前景。

郎印海（2014）用花生壳和小麦秸秆制备生物炭吸附水中的五氯酚，发现花生壳生物炭对 PCP 吸附效果优于小麦秸秆生物炭，本研究也发现三种生物炭中甘蔗渣生物炭对尼泊金乙酯的吸附能力最强，说明生物炭的制备原料不同，吸附能力不同，选择合适的制备原料能最大限度提高生物炭吸附剂的吸附性能。马锋锋等（2015）的研究表明，牛粪生物炭对水中氨氮的吸附是一个快速吸附，缓慢平衡的过程。在本研究发现生物炭对尼泊金乙酯的吸附也是一个先快后慢的过程，吸附在最开始的 120 min 内增加迅速，270 min 后达到吸附平衡。代银分（2016）等研究表明，Langmuir 方程能很好的描述水葫芦、秸秆、松针等五种来源不同的生物炭对磷的等温吸附。本研究也发现 Langmuir 方程能够很好的描述生物炭对尼泊金乙酯的等温吸附。由于生物炭表面含氧基团呈碱性的独特性质，使生物炭在改善土壤环境，提高土壤肥效，改善植物生长环境，保护环境等方面都有巨大潜力，张振国（2016）等指出在黄土中添加由小麦秸秆制成的生物炭可以有效地提高黄土对 NP 的饱和吸附量。表明在土壤中添加生物炭，能有效地减少土壤污染，生物炭在治理农业面源污染、提升耕地质量、修复污染农田、应对气候变化、维持和稳定农业生态系统功能及保障农业环境安全等方面都具有重要意义和应用价值。

参考文献

BRAUSCH JM, RAND GM, 2011. A review of personal care products in the aquatic environment: environmental concentrations and toxicity [J]. Chemosphere, 82(11), 1518-1532.

CHEN M, TANG WH, GE CJ, et al, 2015. Effects of biochar made from bagasse on adsorption behavior of ofloxacin in latosols[J]. Chin J Environ Eng, 9（10）:5083-5090.[陈淼，唐文浩，葛成军，等，2015. 蔗渣生物炭对砖红壤吸附氧氟沙星的影响[J]. 环境工程学报，9(10):5083-5090.]

DAI YF, LI YM, FAN MP, et al, 2016. The study on phosphorus sorption-desorption capacity of different biochar and the effects of its amendment to soil[J]. J Shanxi Agric Univ (Nat Sci Ed), 36(5): 345-351.[代银分，李永梅，范茂攀，等，2016. 不同原料生物炭对磷的吸附-解吸能力及其对土壤磷吸附解析的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版)，36(5)：345-351.]

DHAKA S, KUMAR R, LEE S, et al, 2018. Degradation of ethyl paraben in aqueous medium using advanced oxidation processes: Efficiency evaluation of UV-C supported oxidants [J]. J Clean Prod, 180:505-513.

FIDEL RB, LAIRD DA, THOMPSON ML, et al, 2017. Characterization and quantification of biochar alkalinity [J]. Chemosphere, 167:367-373.

LANG YH, LIU W, WANG H, 2014. Adsorption efficiencies of pentachlorophenol from aqueous solution onto biochars[J]. China Environ Sci, 34(8): 2017-2023.郎印海，刘伟，王慧，2014. 生物炭对水中五氯酚的吸附性能研究[J]. 中国环境科学，34(8)：2017-2023.

MA FF, ZHAO BW, DIAO JR, et al, 2015. Ammonium adsorption characteristics in aqueous solution by dairy manure biochar[J]. Chin J Envir Sci, 36(5):1678-1685. [马锋锋，赵保卫，刁静茹，等，2015. 牛粪生物质炭对水中氨氮的吸附特性[J]. 环境科学，2015，36(5)：1678-1685.]

MEYER S, GLASER B, and QUICKER P, 2011. Technical, Economical, and Climate-Related Aspects of Biochar Production Technologies: A Literature Review [J]. Environ Sci Technol, 45(22): 9473-9483.

WEBER K, QUICKER P, 2018. Properties of biochar [J]. Fuel, 217: 240-261.

YANG CL, LIU LQ, WANG WY, et al, 2018. Effects of the application of straw returing and nitrogen fertilizer on crop yields, water and nitrogen utilization under wheat-maize multiple cropping system[J]. Sci Agric Sin, 51(9):1664-1680.[杨晨璐，刘兰清，王维钰，等，2018. 麦玉复种体系下秸秆还田与施氮对作物水氮利用及产量的效应研究[J]. 中国农业科学，51(9)：1664-1680.]

YU KL, LAU BF, SHOW PL, et al, 2017. Recent developments on algal biochar production and characterization [J]. Bioresource Technol, 246: 2-11.

Zhang ZG, Jiang YF, Mu ZF, et al, 2016. Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China[J]. Chin J Environ Sci, 37(11): 4428-4436. [张振国，蒋煜峰，慕仲锋，等，2016. 生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响[J]. 环境科学，37(11)：4428-4436.]

ZHOU Y, ZHOU QB, GAN SW, et al, 2018. Disparity between willingness to pay/ accept for corn straw counters-field technology: A case study of farmer survey in Xushui District of Baoding City[J]. Chin J Ecol-Agric, 26(5):780-790. [周颖，周清波，甘寿文，等，2018. 玉米秸秆还田技术支付与受偿意愿差异性研究——以保定市徐水区农户调查为例[J]. 中国生态农业学报，26(5)：780-790.]